

高硅铬铁高压直流接地极腐蚀监测技术与焦炭层填充试验研究

李伟¹, 郭子豪¹, 王容², 李松³, 王西香⁴, 张健阳⁵, 董泽华⁶

(1. 国网陕西省电力公司电力科学研究院, 西安 710100; 2. 国网陕西省电力有限公司 超高压公司, 西安 710026; 3. 国网陕西省电力有限公司, 西安 710048; 4. 陕西中试电力科技有限公司, 西安 710100; 5. 武汉科思特仪器股份有限公司, 武汉 430074; 6. 华中科技大学 化学与化工学院 材料服役失效湖北省重点实验室, 武汉 430074)

摘要: 目的 掌握高压直流接地极服役过程中的运行参数及腐蚀状况, 包括接地极运行时周边土壤温湿度和馈电元件的腐蚀速率与腐蚀总量等。方法 采用精密电阻探针腐蚀监测技术以及失重法, 对比研究加和不加焦炭填充料的高硅铬铁直流接地极在强直流试验过程中, 土壤温升与接地极腐蚀情况。结果 基于电阻探针技术, 可以准确测量通电过程中馈电元件的腐蚀总量和腐蚀速率。相反, 受电化学极化原理限制, 电化学监测技术难以对通电状态下的馈电元件腐蚀进行测量。结论 填充的焦炭包覆层能有效延缓高硅铬铁直流腐蚀, 使腐蚀速率下降 96%。这主要归功于高硅铬铁表面包覆焦炭层后, 电解反应从高硅铬铁/土壤层界面过渡到焦炭层/土壤界面, 因而对高硅铬铁起到较好的保护作用。

关键词: 高压直流输电; 高硅铬铁, 接地极; 焦炭层; 腐蚀监测

中图分类号: TG172.3

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2022)10-0119-07

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2022.11.016

Corrosion Monitoring Technology of High Silicon Ferrochrome High-voltage DC Grounding Electrode and Experimental Study on Coke Layer Filling

LI Wei¹, GUO Zi-hao¹, WANG Rong², LI Song³, WANG Xi-xiang⁴, ZHANG Jian-yang⁵, DONG Ze-hua⁶

(1. Electric Power Research Institute of State Grid Shaanxi Electric Power Co., Ltd., Xi'an 710100, China; 2. Ultra-high Voltage Company of State Grid Shaanxi Electric Power Co., Ltd., Xi'an 710026, China; 3. State Grid Shaanxi Electric Power Co., Ltd., Xi'an 710048, China; 4. Shaanxi Pilot Power Technology Co., Ltd., Xi'an 710100, China; 5. Wuhan Kesite Instrument Co., Ltd., Wuhan 430074, China; 6. Hubei Key Laboratory of Material Chemistry and Service Failure, School of Chemistry and Chemical Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

收稿日期: 2021-06-14; 修订日期: 2021-07-21

Received: 2021-06-14; Revised: 2021-07-21

基金项目: 国网陕西省电力公司科技项目 (5226KY17000Y)

Fund: Technology Project of State Grid Shaanxi Electric Power Company (5226KY17000Y)

作者简介: 李伟 (1987—), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统防雷与接地技术。

Biography: LI Wei (1987-), Male, Doctor, Senior engineer, Research focus: lightning protection and grounding technology of power system.

通讯作者: 董泽华 (1968—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为金属腐蚀与防护以及腐蚀监测方法等。

Corresponding author: DONG Ze-hua (1968-), Male, Doctor, Professor, Research focus: metal corrosion and protection and corrosion monitoring methods.

引文格式: 李伟, 郭子豪, 王容, 等. 高硅铬铁高压直流接地极腐蚀监测技术与焦炭层填充试验研究[J]. 装备环境工程, 2022, 19(11): 119-125.

LI Wei, GUO Zi-hao, WANG Rong, et al. Corrosion Monitoring Technology of High Silicon Ferrochrome High-voltage DC Grounding Electrode and Experimental Study on Coke Layer Filling[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(11): 119-125.

ABSTRACT: This paper aims to grasp the operation parameters and corrosion status of HVDC grounding electrode during service, including the temperature and humidity of surrounding soil during the operation of grounding electrode, the corrosion rate and total corrosion amount of feed elements, etc. Using the precision resistance probe corrosion monitoring technology and weight loss method, the soil temperature rise and grounding electrode corrosion of high silicon ferrochrome DC grounding electrode with and without coke filler during the strong DC test were compared. Based on the resistance probe technology, the total corrosion amount and corrosion rate of the feed element can be accurately measured during the power on process. On the contrary, due to the limitation of the electrochemical polarization principle, the electrochemical monitoring technology is difficult to measure the corrosion of the feed element under the power on state. The filled coke coating can effectively delay the DC corrosion of high silicon ferrochrome and reduce the corrosion rate by 96%. This is mainly attributed to the fact that after the high silicon ferrochrome surface is coated with coke layer, the electrolytic reaction transits from the high silicon ferrochrome/soil layer interface to the coke layer/soil interface, thus playing a better role in protecting the high silicon ferrochrome.

KEY WORDS: HVDC transmission; high-silicon ferrochrome; ground electrode; coke packing; corrosion monitoring

随着我国电力系统扩容、输电功率增加、输电距离增长以及不同频率电网之间的联网与送电等需求的增加,提高电能输送效率成为了关键,特高压直流输电由于输电效率高、损耗小,得到了广泛应用。近年来,随着特高压电网的出现,变电站容量的进一步扩大,对其接地网的安全运行状态诊断及其服役年限也提出了更高的要求。

特高压直流输电系统的接地装置通常包括接地导体和活性填充料,而接地导体则由埋入大地一定深度的多个高耐蚀性金属导体组成^[1-5]。高压直流输电正常状态下一般采用双极运行,直流接地极上并不流过电流。然而,当出现线路故障或线路检修时,必须切换到单极大地运行模式,即在输电系统的两端通过大地形成工作电流回路。当数千安的电流流经接地电极时,接地极在土壤孔隙液中将发生严重的电解腐蚀,并致使土壤升温。当温度升高到一定程度时,土壤中的水分蒸发,土壤电阻率增大,电极将出现热不稳定,严重时将使土壤烧结成几乎不导电的玻璃状体,丧失导电功能。尤其是当接地极作为阳极时,电解腐蚀将造成馈电元件截面变小,散流能力降低,严重时将导致馈电元件烧蚀。另外,大电流长时间地通过接地极,还会极大地抬升大地电位,甚至在地面上产生危险性跨步电压。地电位升高还可能给接地极附近的地下金属管道、铠装电缆和接地电气设施(如电力系统、通讯系统)带来杂散电流,降低这些地下基础设施的安全等级。

近年来,接地极腐蚀造成接地电阻过大而引起的电网事故屡有发生,降低接地极电解腐蚀已成为电力系统的一个重要研究课题。为了使接地极在设计年限内长期可靠工作,根据不同的土壤性质,选择正确的接地极材料是关键问题之一。一般用作接地极的材料必须具有良好的电气性能(如高导电率)、物理性质(一定的强韧性和表面硬度)和化学稳定性(耐土壤腐蚀能力)^[6-9]。

通常电极材料可分为可溶性材料(如铁、铜、铝

等金属材料)、难溶性材料(如石墨、高硅铬铁合金)和不溶性贵金属材料(如铂、铑、镀铂钛合金)3类。其中不溶性贵金属材料具有很高的耐蚀性,但由于价格昂贵,很少在输变电中使用。常用作接地极馈电棒的材料有高硅铬铁、石墨棒、铜、铁氧体电极和其他合金等。

目前,我国特高压直流输电线路直接地极中馈电元件材质大都选用高硅铬铁。因此,本文也以高硅铬铁作为土壤电解腐蚀的研究对象。高硅铬铁是在普通高硅铁(含 14.5%Si 和 0.7%Mn)基础上加入 4.25%Cr 后熔炼的,高硅铬铁合金具有更强的耐受卤族气体腐蚀的能力,既可用作土壤电极,也可用作海水电极。高硅铬铁合金电极的腐蚀速度将随溢流密度的增加而快速增加。例如高硅铁电极在溢流密度为 5 mA/cm² 时,接地极的溶解速度只有 0.16 kg/(A·a),约为低碳钢的 1/57,但当溢流密度上升为 80 mA/cm² 时,溶解速度将上升为 3 kg/(A·a),为低碳钢的 1/3。因此,在实际使用时,要对电极的电流密度加以控制^[10]。

直接地极工程中,在馈电单元周围往往敷设一定厚度的焦炭层,焦炭层截面直径在 0.45~0.9 m,主要通过焦炭层来提高土壤导电率,降低发热量,并通过隔离电极与土壤直接接触来减缓电解腐蚀。在现场应用中,焦炭对高硅铬铁接地极腐蚀的缓蚀效果还不明晰。本研究将以精密电阻探针技术作为腐蚀在线监测手段,对比填充和不填充焦炭层时,高硅铬铁电极在服役过程中的腐蚀速率和腐蚀总溶解量^[1],验证填充焦炭层对高硅铬铁直流电解腐蚀的腐蚀抑制和温升抑制效果,为特高压直流接地极的耐久性研究提供支撑。

1 试验

1.1 高硅铬铁电极

高硅铬铁材料的化学成分见表 1,其值符合 DL/T1675—2016《高压直流接地极馈电元件技术条

件》。腐蚀监测用高硅铬铁电极直径为 20 mm, 长度为 200 mm, 采用浇铸成形。高硅铬铁接地极采用同心圆方式布局, 其周边安装 1 只霍尔电流传感器和 1 只温度传感器, 用于监测每根铬铁阳极的溢流密度及土壤温度, 如图 1 所示。

表 1 高硅铬铁主要成分及含量
Tab.1 The main compositions and contents of high silicon ferrochrome

Si	Mn	C	P	S	Cr	Fe	%
14.87	0.085	1.09	≤0.25	≤0.1	4.25	余量	

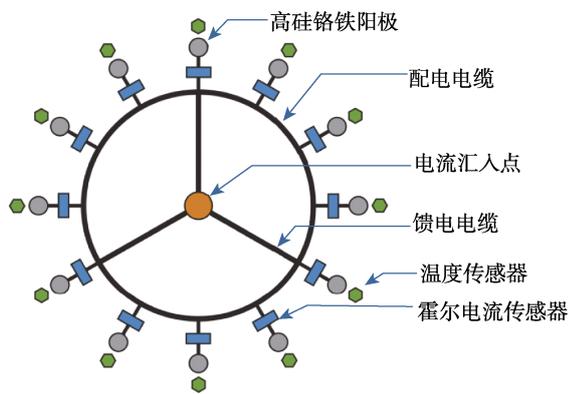


图 1 高压直接地极布置
Fig.1 Schematic diagram of HVDC grounding electrode layout

1.2 焦炭包覆层

直流接地极选用的焦炭为经 1350 °C 煅烧后的石油焦炭, 其技术参数符合 DL/T 1679—2016 《高压直接地极用煅烧石油焦炭技术条件》, 其化学成分见表 2。

表 2 焦炭化学成分及含量
Tab.2 The chemical composition and content of coke

序号	物质名称	占有比例	检测结果	%
1	碳	≥95	98.75	
2	水分	≤0.1	0.01	
3	挥发性组分	≤0.5	0.41	
4	硫	≤1	—	
5	铁	≤0.04	0.033	
6	硅	≤0.06	—	
7	灰分	≤1	0.76	

1.3 腐蚀测量方法

由于高压直接地极不仅受到土壤腐蚀(土壤含水量、土壤通气性和松紧度、土壤 pH 值、土壤含盐量和组成都会影响直流接地极的腐蚀), 在接地极承

载大电流运行时, 还会受到强烈的电解腐蚀。因此, 采用电化学方法监测直流接地极的腐蚀状态, 很容易受到外部电场的干扰, 而且接地电极此时处于强烈极化状态下, 其电流密度与极化电位之间的关系不再符合 Tafel 方程, 造成电化学腐蚀测量结果严重偏离真实情况^[11-13]。采用抗干扰能力强的精密电阻腐蚀测量法, 则不受腐蚀电化学原理限制。直流接地极是隐蔽工程, 采用常规的失重法和目视检测等无法监测其腐蚀状态, 也无法预判腐蚀隐患, 所以采用在线腐蚀监测技术是很有必要的^[14-16]。

1.3.1 精密电阻腐蚀监测原理

电阻腐蚀探头 (Electrical Resistance Probe, ER) 本质上是一种基于欧姆定律实现腐蚀测量的方法, 一般由对称布置的 2 个或多个金属片或棒组成。因土壤腐蚀导致金属截面厚度减薄, 引起电阻增加, 通过测量 2 个金属片的电阻比值随时间的变化, 再基于欧姆定律可反推出厚度或直径变化, 进而计算金属片或棒的腐蚀速率或腐蚀量。电阻探针技术因原理简单, 适用于油、气、土壤等各种腐蚀介质, 广泛应用于腐蚀监测的各个领域^[17-23]。

本研究中的 ER 腐蚀传感器是由 2 个串联的高硅铬铁棒构成, 一根铬铁棒暴露于土壤环境中, 作为腐蚀感受臂 (Sensing) 来记录截面腐蚀引起的导体电阻变化, 另一个表面用环氧树脂掩膜保护作为参考臂 (Reference), 如图 2 所示。通过一个恒流源将恒定电流 (1 A) 流过串联的 2 根高硅铬铁, 然后由精密仪表放大器 A1 和 A2 分别测量参考臂和测量臂两端的电压降 V_f 和 V_x , 由两路 24bit A/D 转换器将微弱的电压降放大并数字化, 最后由单片机 MCU 计算电阻比值 ($\lambda = V_f/V_x$) 和相应的腐蚀余量与腐蚀速率。由于铸铁棒较粗 (20 mm), 欧姆电阻很低 ($\sim 0.1 \text{ m}\Omega$), 实际上参考臂和测量臂两端的电压降 $< 0.1 \text{ mV}$, 需要经过精密放大电路将原始电压放大 1 000 倍后, 再进行数字化才能得到可信的电阻比值。

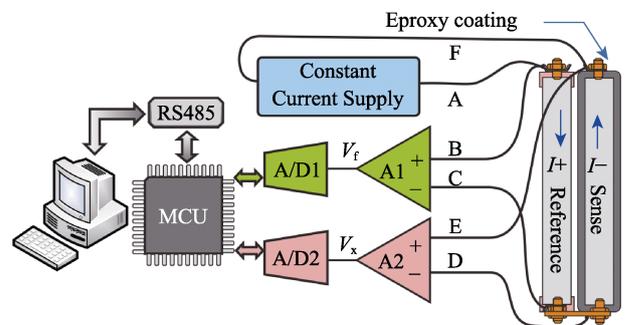


图 2 基于电阻探针原理的高硅铬铁腐蚀测量
Fig.2 Schematic corrosion measurement principle of high silicon ferrochrome based on electrical resistance probe

高硅铬铁棒腐蚀深度可由式 (1) — (3) 进行计算。常温下高硅铬铁的电阻率为 $1.68 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$, 根

据其尺寸计算阻值约为 $0.001\ 07\ \Omega$ 。为了减小温度波动对电阻值的影响,常采用对消法测量参考臂 (R_{ref}) 与测量臂 (R_{sen}) 的电阻之比 λ 。对于图 2, 有:

$$\lambda(t) = \frac{R_{\text{sen}}}{R_{\text{ref}}} = \frac{\rho L_{\text{sen}} / (\pi r_{\text{sen}}^2)}{\rho L_{\text{ref}} / (\pi r_{\text{ref}}^2)} = \frac{L_{\text{sen}}}{L_{\text{ref}}} \left(\frac{r_{\text{ref}}}{r_{\text{sen}}} \right)^2$$

式中: t 代表测量时刻; R_{sen} 和 R_{ref} 、 r_{sen} 和 r_{ref} 、 L_{sen} 和 L_{ref} 分别代表测量臂与参考臂阻值、半径与长度。前者的半径会随着腐蚀进行而逐渐减小,而参考臂由于被环氧树脂密封,其值不会改变。

设有系数 $C = \frac{L_{\text{sen}}}{L_{\text{ref}}} \cdot r_{\text{ref}}^2$, 由于 L_{sen} 、 L_{ref} 、 r_{ref} 均为已知值,可计算 C 值,代入式 (1), 则可求得 t 时刻高硅铬铁棒的剩余半径 (即腐蚀深度) 为:

$$r_{\text{sen}}(t) = \sqrt{\frac{C}{\lambda(t)}}$$

t 时刻腐蚀速率为:

$$V_{\text{corr}} = \frac{dr}{dt} = -\frac{\sqrt{C}}{\lambda^{3/2}} \frac{d\lambda}{dt}$$

1.3.2 试验设计

将高硅铬铁接地极在 2 种接地环境下进行试验,分别是接地极周边填充和不填充焦炭层。具体步骤如下:

1) 在高硅铬铁接地极埋设前,进行称量和尺寸测量,用于验证 ER 测量结果准确性。

2) ER 腐蚀传感器埋设在高硅铬铁之间,二者间距不小于 0.5 m。填充加焦炭组的 1# 温度传感器埋设位置为电极与焦炭的界面,并埋设在焦炭层中; 2# 温度传感器埋设位置为焦炭与土壤的界面,并埋设在土壤中,如图 3 所示。该 ER 腐蚀传感器在非测量期间,通过继电器将测量臂与参考臂短接到直流接地极上,确保 2 个电阻臂与铬钢接地极受到同样强度的直流感电腐蚀。这一设计可以保证 ER 腐蚀监测传感器与高硅铬铁接地极具有相同的腐蚀行为。

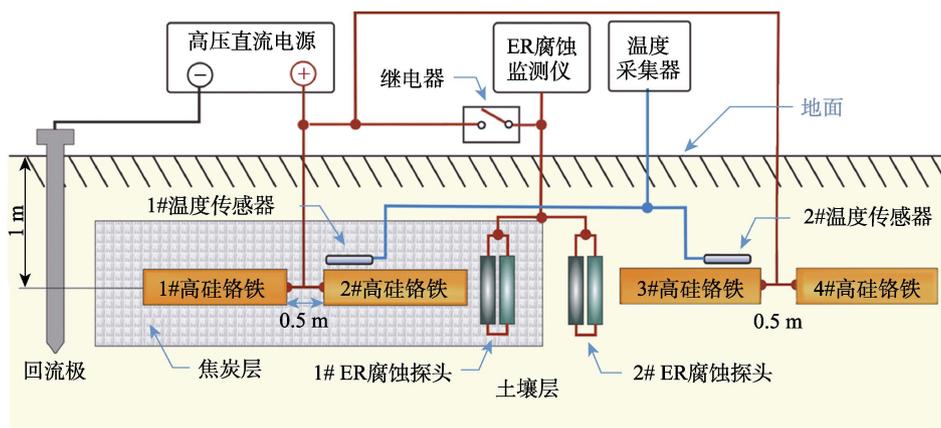


图 3 通电状态下高硅铬铁接地极表面有或无焦炭层包裹时的腐蚀监测试验布置

Fig.3 Schematic corrosion monitoring for high silicon ferrochrome grounding electrode with or without coke wrapping under energized condition

3) 1#、2# 高硅铬铁以及 1# ER 腐蚀监测探头和 1# 温度传感器均埋置于焦炭层中, 3#、4# 高硅铬铁以及 2# ER 腐蚀监测探头和 2# 温度传感器表面均不包裹焦炭层, 直接埋置于土壤中。

4) 回流极 (负极) 埋设在远端, 距试验地不小于 10 m。回流极采用不锈钢或碳钢单极, 接地电阻不大于 $5\ \Omega$ 。

5) 每种环境通入电流 20 A, 每天用钳表测量每支电极电流。每种环境试验时间 200 h。每天记录 3 次, 早、中、晚各 1 次。

2 结果与讨论

2.1 现场埋入的高硅铬铁电极的试验数据统计

高硅铬铁接地极的腐蚀质量损失量按照 DL/T

1554—2016《接地网土壤腐蚀性评价导则》进行评价, 埋设前须进行称量和尺寸测量, 1#、2#、3#、4# 这 4 根高硅铬铁的测量结果见表 3。其中 1#、2# 高硅铬铁埋置于焦炭层中, 而 3#、4# 试样则直接埋置于土壤中, 2 只电阻腐蚀传感器也分别置于同样的环境中。由表 3 可以发现, 1#、2# 的腐蚀速率较低, 3#、4# 电极的腐蚀较为严重。

从表 3 来看, 接地极表面覆盖焦炭层时, 1#、2# 高硅铬铁电极通电前后仅有微小的质量变化 (1 g 左右), 平均质量损失速率为 $0.005\ 82\ \text{kg}/(\text{A}\cdot\text{a})$ 。当电极无焦炭层包裹时, 3#、4# 高硅铬铁电极通电前后质量发生较大变化, 平均质量损失速率为 $0.823\ \text{kg}/(\text{A}\cdot\text{a})$ 。4 根高硅铬铁进行通电腐蚀试验后的形貌如图 4 所示。其中, 1#、2# 接地极基本保持光亮, 但 3#、4# 接地极的光泽度略有下降, 不过由于其质量损失不到 6 g, 总体腐蚀形态也不严重。

表 3 高硅铬铁的腐蚀质量损失状况
Tab.3 Weight loss of high silicon ferrochrome electrodes buried in coke layer and soil

试样	埋置点	直径/mm	长度/mm	质量/kg		通电量/(A·h)	质量损失速率/(kg·A ⁻¹ ·a ⁻¹)	缓蚀效率/%
				试验前	试验后			
1#	焦炭层	49.53	1526	20.950	20.951	1502.14	0.005 53	99.4
2#	焦炭层	49.34	1514	21.070	21.069	1461.41	0.005 98	99.2
3#	土壤	47.84	1512	20.285	20.259	265.22	0.859	—
4#	土壤	49.62	1515	21.315	21.303	133.71	0.786	—



图 4 高硅铬铁棒腐蚀试验后的表面形貌
Fig.4 Photograph of high silicon ferrochrome rods after corrosion test

通过试验结果可以看出, 高硅铬铁电极包覆焦炭层后, 其腐蚀过程受到了一定的抑制。焦炭是一种高导电性无定型碳材料, 将金属与土壤间的离子导电转换为金属与焦炭之间的电子导电, 从而减缓了接地极大过流状态下的电解腐蚀。当然, 埋于土壤中的焦炭会吸收一定水分和盐分, 在焦炭层中也会出现离子导电, 水分渗透到高硅铬铁电极表面, 也会发生阳极电解反应, 但显然比直接接触土壤要小很多。

2.2 接地体腐蚀在线监测

电阻探针腐蚀监测是通过测量金属敏感元件(金属丝或金属片)腐蚀过程中, 由于金属逐渐减薄所造成的微小电阻值增加, 来实现已腐蚀量和腐蚀速度的实时监测。图 5a 为腐蚀检测传感器实物, 传感器分为 2 部分, 裸露在外面的部分直接跟土壤接触, 参考电阻封装在环氧中, 与土壤隔离。图 5b 为传感器安装现场。图 6 为安装在现场的高硅铬铁腐蚀监测仪, 不锈钢防护箱可以对内部的仪器进行保护, 以免受雨水、灰尘等干扰。

电阻探针腐蚀传感器埋设在高硅铬铁的之间, 如图 3 所示。加和加不加焦炭组下电阻探针腐蚀传感器的测试曲线如图 7 所示。其中图 7a 为没有埋置于焦炭层中的 2#电阻腐蚀监测探头的腐蚀速率与腐蚀总量曲线, 而图 7b 则为埋置于焦炭层中的 1#腐蚀监测探头的腐蚀曲线。在没有包裹焦炭层时, 探头的总腐蚀减薄量为 2.2 μm, 腐蚀速率在以均值为 6.76 μm/a 的中心线上下波动。这种波动可能受土壤含水率和温度波动所致, 折算成电解质量损失率约为 1.003 kg/(A·a), 表明由于强烈电解导致的高硅铬铁溶解量还是较为可观的。



图 5 高硅铬铁腐蚀传感器及其安装现场
Fig.5 (a) Electrical resistance probe for the corrosion monitoring of high silicon ferrochrome and (b) installation site



图 6 高硅铬铁腐蚀监测仪安装现场
Fig.6 Installation site of high silicon ferrochrome corrosion monitoring equipment

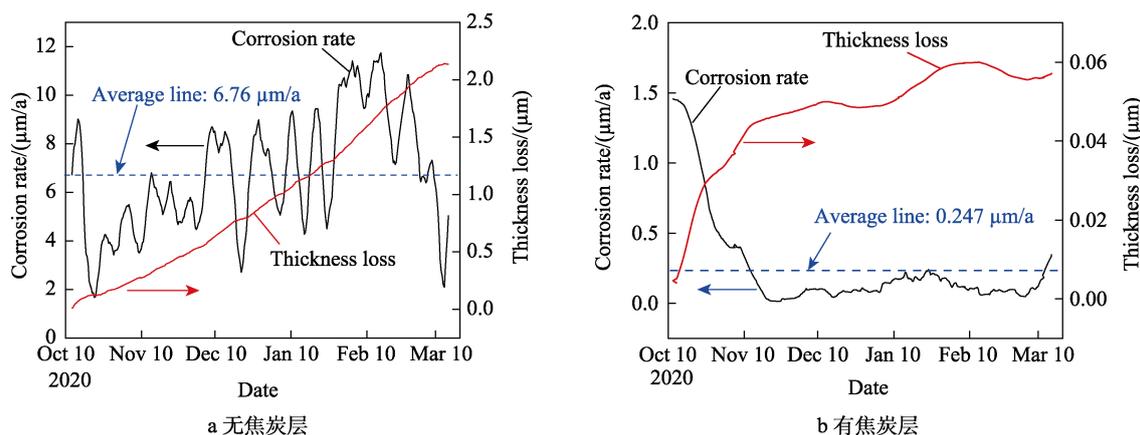


图7 高硅铬铁电阻探针在表面没有和有焦炭层包覆时的腐蚀速率与腐蚀减薄监测曲线
Fig.7 Corrosion rate and corrosion thinning curve of high silicon ferrochrome based on electrical resistance probe (a) with coke coating and (b) without coke coating wrapped on the surface of electrical resistance probe

相反,埋置于焦炭层中的1#电阻腐蚀监测探头,由于焦炭良好的导电率,使电极表面的温升减小,大部分电化学反应从高硅铬铁/土壤层界面过渡到焦炭层/土壤界面,因而高硅铬铁棒的溶解速度大幅度较低,4个月的减薄率仅为 $0.06\ \mu\text{m}$,腐蚀速率均值为 $0.247\ \mu\text{m/a}$,折算成电解质量损失率约为 $0.036\ \text{kg}/(\text{A}\cdot\text{a})$ 。焦炭层填充对高硅铬铁电解腐蚀抑制率可以达到96%以上。对比表3中同步进行的腐蚀质量损失试验结果可见,电阻探针传感器监测的腐蚀速率结果与失重法基本是一致的,说明电阻探针技术可以实时反映接地极材料在通电状态下的腐蚀状况,这是常规电化学腐蚀监测方法所不具备的。

3 结论

本文采用表面包覆和不包覆焦炭层的高硅铬铁接地极进行强直流通流试验,一方面验证电阻探针腐蚀在线监测方法的可靠性,另一方面验证焦炭延缓高硅铬铁直流腐蚀的效果。得到如下结论:

1) 高硅铬铁表面包裹焦炭层后,由于后者良好的导电性,使电化学反应从高硅铬铁/土壤界面转移到焦炭层/土壤界面,因而对高硅铬铁接地极电解腐蚀具有显著缓解作用。

2) 采用精密电阻探针技术实时监测来高硅铬铁在通电状态下的腐蚀状态,其测量结果与失重方法测量值具有较好的一致性,表明电阻探针能实时监测接地极在通电状态下的腐蚀速率和溶解量,这是常规电化学方法所无法实现的。

3) 实现特高压直流接地极的腐蚀与服役安全监控,可以采用可靠性高、不受地电场影响的精密电阻探针技术实现接地极的腐蚀量、腐蚀余量和腐蚀速率的在线监测,用于评估强直流干扰对直流接地极腐蚀的影响,评价直直接地极的剩余服役寿命。

参考文献:

- [1] 刘健,王树奇,李志忠,等. 接地网腐蚀故障诊断的可测性研究[J]. 高电压技术, 2008, 34(1): 64-69.
LIU Jian, WANG Shu-qi, LI Zhi-zhong, et al. Testability of Grounding Grids Corrosion Diagnosis[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(1): 64-69.
- [2] 王硕,刘渝根,游建川,等. 大型接地网腐蚀优化诊断[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2006, 29(8): 33-35.
WANG Shuo, LIU Yu-gen, YOU Jian-chuan, et al. Erosion Optimized Diagnosis of Brand Grounding Grid[J]. Journal of Chongqing University (Natural Science Edition), 2006, 29(8): 33-35.
- [3] 刘洋,崔翔,赵志斌,等. 基于电磁感应原理的变电站接地网腐蚀诊断方法[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(4): 97-103.
LIU Yang, CUI Xiang, ZHAO Zhi-bin, et al. Method of Corrosion Diagnosis of Substations' Grounding Grids Based on Electromagnetic Induction Theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(4): 97-103.
- [4] 于金山,万闪,赵鹏,等. 高压电网大气腐蚀在线监测技术进展[J]. 装备环境工程, 2020, 17(4): 27-33.
YU Jin-shan, WAN Shan, ZHAO Peng, et al. Advances of Atmospheric Corrosion On-Line Monitoring Techniques for Electric Power Grid[J]. Equipment Environmental Engineering, 2020, 17(4): 27-33.
- [5] 刘渝根,滕永禧,陈先禄,袁涛. 接地网腐蚀的诊断方法研究[J]. 高电压技术, 2004, 30(6): 19-21.
LIU Yu-gen, TENG Yong-xi, CHEN Xian-lu, et al. A Method for Corrosion Diagnosis of Grounding Grid[J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(6): 19-21.
- [6] 寄玉玉,王佩,张秀丽,等. 接地网腐蚀状态原位检测技术研究[J]. 华北电力技术, 2012(8): 34-37.
JI Yu-yu, WANG Pei, ZHANG Xiu-li, et al. Research on Detection Techniques of Grounding Grid Corrosion in Situ[J]. North China Electric Power, 2012(8): 34-37.
- [7] 朱志平,马骁,荆玲玲,等. 变电站土壤腐蚀性评价及

- 接地网金属腐蚀特性分析[J]. 电瓷避雷器, 2009(4): 18-22.
- ZHU Zhi-ping, MA Xiao, JING Ling-ling, et al. Soil Corrosion Evaluation of Substation and Metal Corrosion Characteristics Analysis for Grounding Grid[J]. Insulators and Surge Arresters, 2009(4): 18-22.
- [8] 邓盼, 周艺, 朱志平, 等. 接地网材料在土壤中的腐蚀现状及腐蚀机理分析[J]. 广东化工, 2015, 42(4): 12-14.
- DENG Pan, ZHOU Yi, ZHU Zhi-ping, et al. Status and Corrosion Mechanism of Corrosion Grounding Mesh Material in the Soil Analysis[J]. Guangdong Chemical Industry, 2015, 42(4): 12-14.
- [9] 周佩朋, 王森, 李志忠, 等. 耐蚀性金属接地材料研究综述[J]. 电力建设, 2010, 31(8): 50-54.
- ZHOU Pei-peng, WANG Sen, LI Zhi-zhong, et al. Review of Corrosion Resistant Metals for Grounding[J]. Electric Power Construction, 2010, 31(8): 50-54.
- [10] 闫爱军, 邓博, 付纪华, 等. 碳钢接地网在土壤中的腐蚀机理研究[J]. 陕西电力, 2013, 41(6): 65-67.
- YAN Ai-jun, DENG Bo, FU Ji-hua, et al. Corrosion Mechanism of Carbon Steel Grounding Grid in Soil[J]. Shaanxi Electric Power, 2013, 41(6): 65-67.
- [11] 郝晋堂, 徐霞, 王天正, 等. 土壤腐蚀等级评价方法在变电站接地网中的应用[J]. 科技视界, 2015(30): 272.
- HAO Jin-tang, XU Xia, WANG Tian-zheng, et al. Application of Soil Corrosion Grade Evaluation Method in Substation Grounding Grid[J]. Science & Technology Vision, 2015(30): 272.
- [12] 柏任流, 董泽华, 郭兴蓬, 等. 基于温度补偿的电阻探针腐蚀监测原理的研究[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2007, 19(5): 338-341.
- BAI Ren-liu, DONG Ze-hua, GUO Xing-peng, et al. Study on Principle of Electrical Resistance Probe Based on-Temperature Compensation for Corrosion Monitoring[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2007, 19(5): 338-341.
- [13] FELIU S, GONZÁLEZ J A, ANDRADE C. Effect of Current Distribution on Corrosion Rate Measurements in Reinforced Concrete[J]. CORROSION, 1995, 51(1): 79-86.
- [14] FELIU S, GONZÁLEZ J A, MIRANDA J M, et al. Possibilities and Problems of in Situ Techniques for Measuring Steel Corrosion Rates in Large Reinforced Concrete Structures[J]. Corrosion Science, 2005, 47(1): 217-238.
- [15] 顾梦君, 杨凡, 邓亚文. 变电所接地装置钢质腐蚀及电化学保护的探讨[J]. 云南电力技术, 2004, 32(2): 17-18.
- GU Meng-jun, YANG Fan, DENG Ya-wen. Analysis and Discussion on Steel Corrosion and Electrochemical Protection of Grounding Device in Substation[J]. Yunnan Electric Power, 2004, 32(2): 17-18.
- [16] 廖怀东, 李建平, 关键. 变电站接地网腐蚀机理及材料选择[J]. 电世界, 2006, 47(9): 30-31.
- LIAO Huai-dong, LI Jian-ping, GUAN Jian. Corrosion Mechanism and Material Selection of Substation Grounding Grid[J]. Electrical World, 2006, 47(9): 30-31.
- [17] 邵玉佩, 闫爱军, 李波, 等. 接地极 Q235 碳钢材料在上海土壤环境中的腐蚀行为[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2015, 27(4): 333-338.
- SHAO Yu-pei, YAN Ai-jun, LI Bo, et al. Corrosion Behavior of Q235 Carbon Steel for Grounding Grids in Soil at Shanghai District[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2015, 27(4): 333-338.
- [18] PROSEK T, TAUBE M, DUBOIS F, et al. Application of Automated Electrical Resistance Sensors for Measurement of Corrosion Rate of Copper, Bronze and Iron in Model Indoor Atmospheres Containing Short-Chain Volatile Carboxylic Acids[J]. Corrosion Science, 2014, 87: 376-382.
- [19] MARJA-AHO M, RAJALA P, HUTTUNEN-SAAKIVIRTA E, et al. Copper Corrosion Monitoring by Electrical Resistance Probes in Anoxic Groundwater Environment in the Presence and Absence of Sulfate Reducing Bacteria[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2018, 274: 252-261.
- [20] DE ALMEIDA SOUZA TORRES C E, COSTA C G F, PEREIRA A P, et al. Corrosion Failure Analysis in a Biodiesel Plant Using Electrical Resistance Probes[J]. Engineering Failure Analysis, 2016, 66: 365-372.
- [21] CRISTIANI P, PERBONI G. Antifouling Strategies and Corrosion Control in Cooling Circuits[J]. Bioelectrochemistry, 2014, 97: 120-126.
- [22] KOURIL M, PROSEK T, SCHEFFEL B, et al. Corrosion Monitoring in Archives by the Electrical Resistance Technique[J]. Journal of Cultural Heritage, 2014, 15(2): 99-103.
- [23] ABUEL-NAGA H M, BOUAZZA A. Electrical Resistance Method for Assessing Spatial Variation of Water Content in Geosynthetic Clay Liners at Laboratory Scale[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2016, 44(1): 117-121.

责任编辑: 刘世忠